

Hintergrundinformationen zu ausgewählten Themen zum nuklearen Störfall in Japan

Nr. 020
(25.03.2011, 11:00 Uhr)

Bautechnische Auslegung von Kernkraftwerken für Erdbeben

(Hochtief)

Dr.-Ing. H. Sadegh-Azar, Dr.-Ing. A. Garg
HOCHTIEF Consult IKS Energy, Lyoner Str. 25, 60528 Frankfurt

Kurzfassung aus den folgenden Papers:

- Sadegh-Azar, H., Garg, A., „Bautechnische Auslegung von Kernkraftwerken für Erdbeben“, atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Dez. 2009
- Sadegh-Azar, H., Garg, A., „Bautechnische Auslegung von Kernkraftwerken für Erdbeben“, VGB-PowerTech, Heft 5, 2010
- Sadegh-Azar, H., Hartmann, H.-G., „Grundlagen der seismischen Auslegung von Kernkraftwerken und Einfluss der Boden-Bauwerk Wechselwirkung“, Bauingenieur (D-A-CH-Mitteilungsblatt), März 2011

1. Einführung

Weltweit werden Bauwerke für eine ganze Reihe von Einwirkungen ausgelegt. Neben den vorwiegend ruhenden Lasten sind in der Regel auch dynamische Einwirkungen wie Wind oder Erdbeben zu berücksichtigen. Sowohl Wind als auch Erdbeben können große Horizontallasten verursachen, wobei das Bauwerk in der Lage sein muss, diesen Lasten zu widerstehen.

Bauwerke, deren Unversehrtheit während und nach einem Erdbeben von höchster Wichtigkeit für den Schutz der Bevölkerung ist, z. B. Krankenhäuser, Feuerwachen, fossile Kraftwerke, LNG-Tanks, chemische Großanlagen, werden für extrem starke und seltene Erdbeben ausgelegt. Kernkraftwerke hingegen werden für noch stärkere und unwahrscheinlichere Erdbeben (die sogenannten Sicherheitserdbeben) ausgelegt. Die Wiederkehrperiode für das zu berücksichtigende Sicherheitserdbeben liegt weltweit zwischen 10.000 bis 100.000 Jahren (in Deutschland 100.000). Zum Vergleich beträgt die anzusetzende Wiederkehrperiode bei normalen Industrieanlagen oder Bauwerken 475 Jahre.

Die Auslegung normaler Bauwerke in Deutschland infolge Erdbeben basiert auf der neuen DIN 4149 [1]. Die der DIN 4149 entsprechende Norm in Europa ist der Eurocode 8 [2]. Ziel der Normen ist, im Falle eines Erdbebens menschliches Leben zu schützen, Schäden zu begrenzen und sicherzustellen, dass für die öffentliche Sicherheit und Infrastruktur wichtige bauliche Anlagen funktionstüchtig bleiben.

Für kerntechnische Anlagen liegen die Anforderungen an die Erdbebenauslegung wesentlich höher. Diese sind in den Sicherheitsrichtlinien der IAEA (International Atomic Energy Agency) sowie in den

länderspezifischen Erdbebennormen festgelegt. Die länderspezifische Erdbebennorm für Deutschland ist die KTA 2201 „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen“ [3].

Die gesamte Berechnungskette vom Erdbebenherd über den Untergrund ins Bauwerk bis zur Komponente wird in gestaffelte Berechnungsschritte eingeteilt. Die Berechnungsschritte werden in Abschnitt 3 vorgestellt. Jeder Berechnungsschritt wird entkoppelt von den anderen durchgeführt. Hierdurch entstehen Konservativitäten und Sicherheitsmargen, die in der gesamten Berechnungskette jeweils aufsummiert werden. Diese zusätzlichen Sicherheitsmargen und Konservativitäten in der Auslegung für Erdbeben werden in Abschnitt 4 dargestellt. In Abschnitt 5 wird die Auslegung von aktuellen Kernkraftwerkstypen in Ländern mit hoher Erdbebengefährdung diskutiert. Zum Abschluss werden in Abschnitt 6 Erfahrungen mit operierenden Kernkraftwerken bei großen Erdbeben analysiert. Die Schadensbeobachtungen bei diesen Erdbeben zeigen eine hohe Robustheit dieser Bauwerke bei Erdbeben. Zudem wird das hohe Maß an Konservativität in der Auslegung der Kernkraftwerke bestätigt.

2 Internationale Sicherheitsanforderungen und -richtlinien

2.1 Allgemeines

Die IAEA hat in einer Reihe von Publikationen die allgemeine Vorgehensweise zur sicheren Auslegung von Kernkraftwerken für seismische Einwirkungen beschrieben. Basierend auf den in NS-R-1 [5] dargelegten Sicherheitsanforderungen an die Bemessung von Kernkraftwerken werden in den Sicherheitsrichtlinien NS-G-3.3 [6] und NS-G-1.6 [7] Empfehlungen zur Bestimmung der seismischen Einwirkungen und der entsprechenden Bemessung von Kernkraftwerken gegeben. Diese Dokumente bilden die Grundlage für die nationalen Normenwerke der IAEA-Mitgliedsstaaten bezüglich der Auslegung von Kernkraftwerken für seismische Einwirkungen.

2.2 Sicherheitskonzept der Auslegung für seismische Einwirkungen

2.2.1 Bemessungserdbeben

Die IAEA-Sicherheitsrichtlinie NS-G-1.6 [7] beschreibt das grundlegende Sicherheitskonzept zur Auslegung von Kernkraftwerken für seismische Einwirkungen. Im Rahmen dieses Sicherheitskonzepts wird zwischen einem Sicherheitserdbeben (safe shutdown earthquake) und einem Auslegungserdbeben (operation basis earthquake) unterschieden. Das Sicherheitserdbeben hat dabei ausschließlich sicherheitstechnischen Charakter, d.h. während und nach dem Eintreten eines solchen Erdbebens müssen alle Funktionen für das sichere Abfahren der Anlage und die Abfuhr der Nachzerfallswärme gewährleistet sowie der Einschluss der radioaktiven Spaltprodukte sichergestellt sein. Das Auslegungserdbeben hat indes einen operativen Fokus. Es soll sichergestellt werden, dass bei kleineren Erschütterungen die Anlage möglichst ohne Unterbrechung weiterbetrieben werden kann.

2.2.2 Seismische Klassifizierung

Um ein sicherheitsorientiertes Vorgehen für die Auslegung von Kernkraftwerken für seismische Einwirkungen zu ermöglichen, werden die Bauwerksstrukturen, Anlagensysteme und Komponenten hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz bei Erdbebenereignissen klassifiziert. Tabelle 1 beschreibt die nach IAEA-Sicherheitsrichtlinie NS-G-1.6 [7] differenzierte Unterteilung in vier Bauwerksklassen.

3. Methoden und Modelle zur Auslegung der Kernkraftwerke für Erdbeben

3.1 Seismologische und bodendynamische Grundlagen

Von der Entstehung eines Erdbebens bis zu seiner Wirkung auf Bauwerke laufen drei wesentliche Vorgänge ab (Abb. 1):

- a) Entstehung seismischer Wellen im Erdbebenherd
- b) Ausbreitung der seismischen Wellen in der Erdkruste, den geologischen Schichten und den oberflächennahen Bodenschichten bis zum Standort.
- c) Veränderung der seismischen Wellen beim Durchgang der lokalen Bodenschichtung im Bereich des Baugrundes am Standort hinsichtlich des Frequenzverhaltens und der Amplituden.

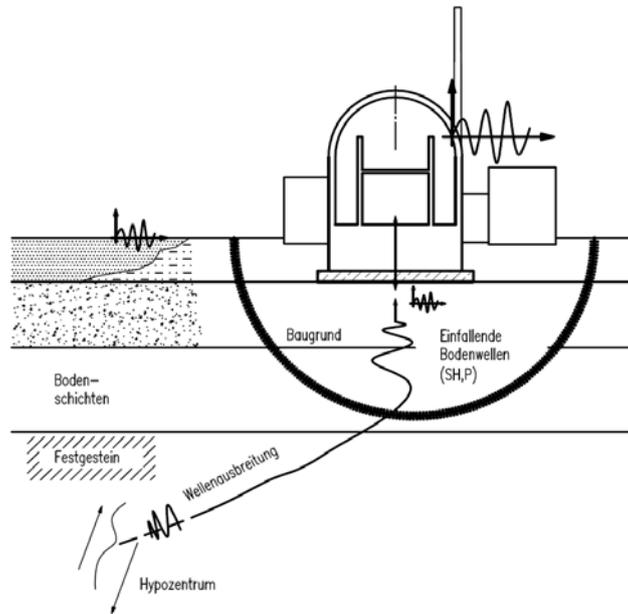


Abb. 1: Entstehung eines Erdbebens bis zu seiner Wirkung auf Bauwerke

3.2 Beschreibung und Quantifizierung der Einwirkung infolge Erdbeben

Die Einwirkungen infolge Erdbeben in jeder Richtung werden in der Regel durch ein Bodenantwortspektrum für einen bestimmten Horizont (z.B. Geländeoberfläche) gegeben. In Abb. 2 ist ein typisches Bodenantwortspektrum dargestellt. Dieses Spektrum enthält und repräsentiert alle für die bauliche Auslegung erforderlichen Eingangsgrößen. Die Vorgabe eines Bodenantwortspektrums für einen bestimmten Standort erfolgt basierend auf umfangreichen Untersuchungen und Auswertungen durch Seismologen. Alternativ oder additiv können auch eine Anzahl von Erdbeben-Beschleunigungszeitverläufen vorgegeben oder künstlich aus dem Spektrum generiert werden. Abb. 3 zeigt einen typischen Erdbebenzeitverlauf.

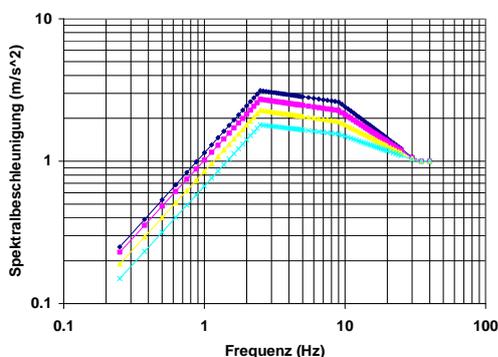


Abb. 2: Typisches Bodenantwortspektrum für die Auslegung (hier mod. USAEC-Spektrum, D ist die Dämpfung)

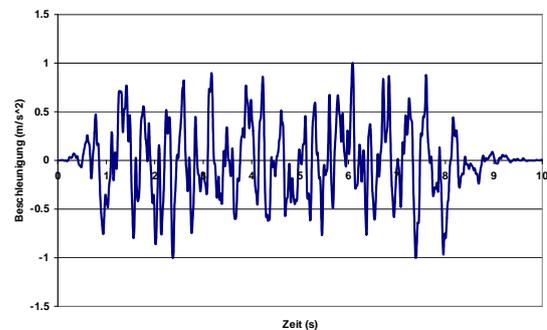


Abb. 3: Typischer Erdbebenzeitverlauf für die Auslegung

3.3 Dekonvolution

In der Regel liegt die seismische Lastbeschreibung in der Form eines Bodenantwortspektrums im Freifeld vor, das heißt an der Oberfläche des tragfähigen Baugrundes (siehe 3.2). Um die Anregung auf einen anderen Horizont (z.B. Fundamentunterkante) umzurechnen wird eine Dekonvolution durchgeführt. Bei der Dekonvolutionsberechnung werden mögliche Streuungen der Bodeneigenschaften berücksichtigt. Die resultierenden Ergebnisse werden konservativ eingehüllt.

3.4 Boden-Bauwerk-Wechselwirkung

Bei Erdbeben bewegt sich der Boden in einem hinreichenden Abstand vom Bauwerk unbeeinflusst von diesem, als sogenannte Freifeldbewegung. Nähern wir uns dem Bauwerk bis zum Fundament,

beobachten wir zunehmend Unterschiede in der Bodenbewegung. Diese Unterschiede werden im Wesentlichen durch die Steifigkeit der Gründung (z. B. steifer Keller oder Pfahlgründung) und durch die träge Bauwerksmasse verursacht. Bei der Auslegung der Bauwerke und bei Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung werden die Bodeneigenschaften weit gestreut. Die resultierenden Ergebnisse werden konservativ eingehüllt.

3.5 Bauwerksanalyse und Bemessung

Bei der Bauwerksanalyse können unterschiedlich aufwendige und detaillierte Modelle und Berechnungsmethoden verwendet werden. Der Detaillierungsgrad und die Berechnungsmethoden variieren je nach Bauwerkskomplexität. In Abb. 4a-b sind typische Bauwerksmodelle dargestellt.

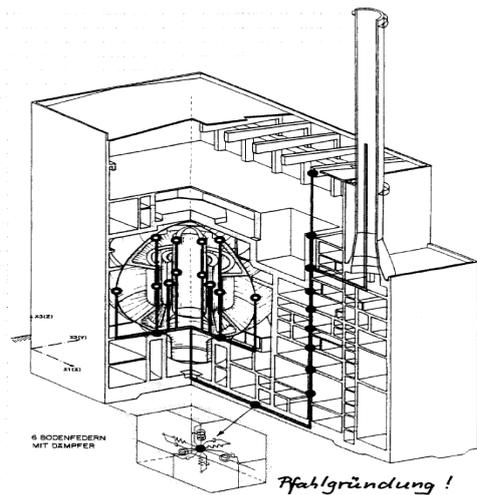
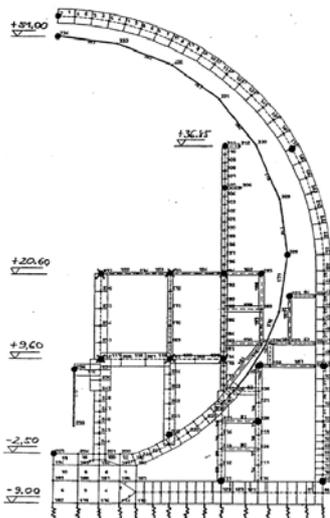
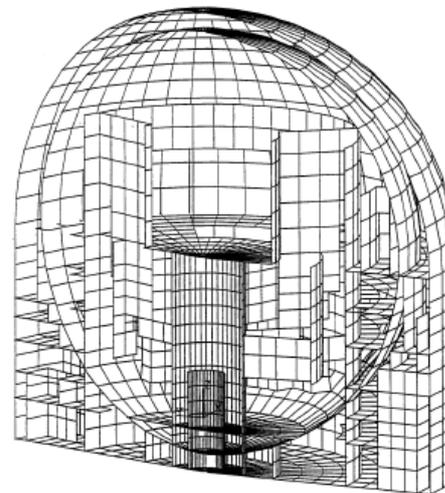


Abb. 4a: 3D Stabmodell Reaktorgebäude



Rotationssymmetrische Schalen- und Volumenelemente



3D Schalenmodell

Abb. 4b: Verschiedene Bauwerksmodelle für ein Reaktorgebäude

Die Ergebnisse jedes Berechnungsverfahrens sind die Schnittkräfte und Verformungen infolge Erdbeben. Diese werden mit den Schnittgrößen und Verformungen aus den ständigen Lasten (Eigengewicht, Teile der Verkehrslasten, etc.) überlagert. Die Querschnitte der einzelnen Baustrukturen (Stützen, Wände, Decken usw.) werden dann entsprechend der gültigen Baunormen (z.B. DIN 1045-1,

Eurcode 2, ACI, etc.) dimensioniert und bewehrt, so dass die Tragfähigkeit der Strukturen größer als die Beanspruchungen sind. Das Bauwerk wird somit deterministisch sicher für Erdbeben ausgelegt.

Bauwerke haben die Möglichkeit, durch plastisches Materialverhalten zusätzlich große Mengen der Erdbebenenergie zu absorbieren. Durch das plastische Verhalten wird das Bauwerk zudem weicher und entzieht sich hohen Erdbebenbelastungen. Diese Effekte werden bei der Auslegung von normalen Industrieanlagen oder Bauwerken berücksichtigt und ausgenutzt. Bei der Auslegung von Kernkraftwerken bleiben diese nichtlinearen Materialreserven jedoch im Wesentlichen ungenutzt.

3.6 Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren, Sekundärspektren)

Für die Auslegung von Anlagenteilen, Komponenten und Rohrleitungen werden Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren) genutzt. Diese beschreiben die Anregung auf einer bestimmten Ebene im Gebäude auch in Form eines Spektrums.

Diese werden entweder mit den gleichen Modellen wie bei der Bauwerksanalyse oder etwas vereinfachten Bauwerksmodellen ermittelt. Nach Ermittlung der Spektren auf der gegebenen Ebene (Punkt 4 in Abb. 5) werden diese eingehüllt und verbreitert.

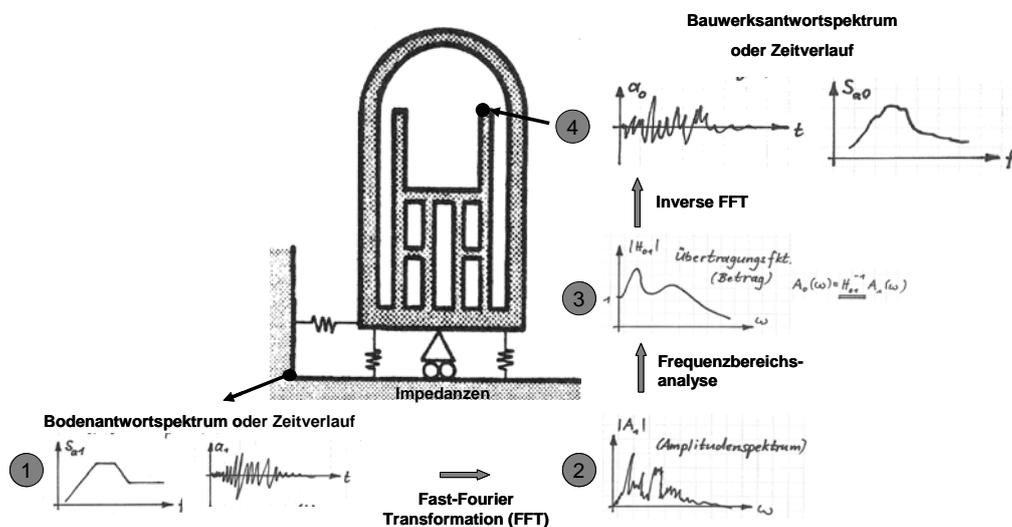


Abb. 5: Vorgehensweise zur Ermittlung der Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren)

4. Zusätzliche Sicherheiten und Konservativitäten in der Auslegung für Erdbeben

Die Auslegung für Erdbeben ist schon allein wegen der vielen Schnittstellen in der gesamten Berechnungskette und der jeweils zu berücksichtigenden einhüllenden, abdeckenden und ungünstig anzunehmenden Randbedingungen konservativ.

In jedem einzelnen Berechnungsschritt liegen in der Regel jedoch noch zusätzliche Reserven und Konservativitäten, die nicht genutzt oder angesetzt werden. Hier werden diese Reserven und Konservativitäten nochmals zusammengefasst:

- **Seismologische Grundlagen und Beschreibung sowie Quantifizierung der Einwirkung infolge Erdbeben:** Die ingenieurmäßigen Kennzahlen für die Erdbebenanregung basieren i. d. R. auf statistischen Auswertungen repräsentativer Erdbebenregistrierungen und hüllen diese konservativ ein. Bei der Ermittlung der seismischen Lasten werden Teile der Streuungen, Unsicherheiten und unbekannte Boden- und Herdparameter konservativ abgedeckt. Das resultierende Spektrum ist in der Regel ein eingehülltes und verbreitertes Spektrum.
- **Dekonvolution:** Bei der Dekonvolutionberechnung werden Extremwerte der Bodeneigenschaften (Maximal- und Minimalwerte) berücksichtigt. Die resultierenden Ergebnisse werden konservativ eingehüllt.
- **Boden-Bauwerk-Wechselwirkung:** Bei der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung wird die Dämpfung aus Hysterese und Energieabstrahlung bei der Anwendung modaler Verfahren auf 15% (für Horizontal- und Drehschwingungen) bzw. 30% (für Vertikalschwingungen) der kritischen Dämpfung

begrenzt. Nur bei Berechnungen im Frequenzbereich (Tab. 2) können diese Reserven aktiviert werden. Zudem werden die Bodeneigenschaften weit gestreut. Die resultierenden Ergebnisse werden konservativ über alle möglichen Extremwerte eingehüllt.

- Bauwerksanalyse und Bemessung: Die Konservativitäten in diesem Teil können in drei Hauptgruppen eingeteilt werden:
 - a) Bauwerke haben die Möglichkeit durch plastisches Materialverhalten große Mengen der Erdbebenenergie aufzunehmen. Durch das plastische Verhalten wird das Bauwerk zudem weicher und entzieht sich hohen Erdbebenbelastungen.
 - b) Die Bemessungsvorschriften selbst enthalten Sicherheitsfaktoren, welche bei der Auslegung immer angesetzt werden.
 - c) Die Bemessung erfolgt mit charakteristischen Werten der Materialfestigkeitseigenschaften. Diese entsprechen den 95%-Fraktile und sind somit konservativ. Zudem steigt die Festigkeit von Beton mit dem Alter. (Grundlage der Bemessung ist die 28-Tage Festigkeit.)
- Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren): Die Bauwerksantwortspektren werden in der Regel ebenenweise eingehüllt und geglättet. Hierdurch ist der Ansatz von Bauwerksantwortspektren konservativ.

5. Kernkraftwerke in Ländern mit hoher Erdbebengefährdung: USA, Japan, etc.

In Abb. 6 sind die weltweit existierenden Kernkraftwerke und die entsprechende Erdbebengefährdung dargestellt. Wie aus dieser Karte zu erkennen ist, stehen eine große Anzahl von Kernkraftwerken in seismisch aktiven Regionen.

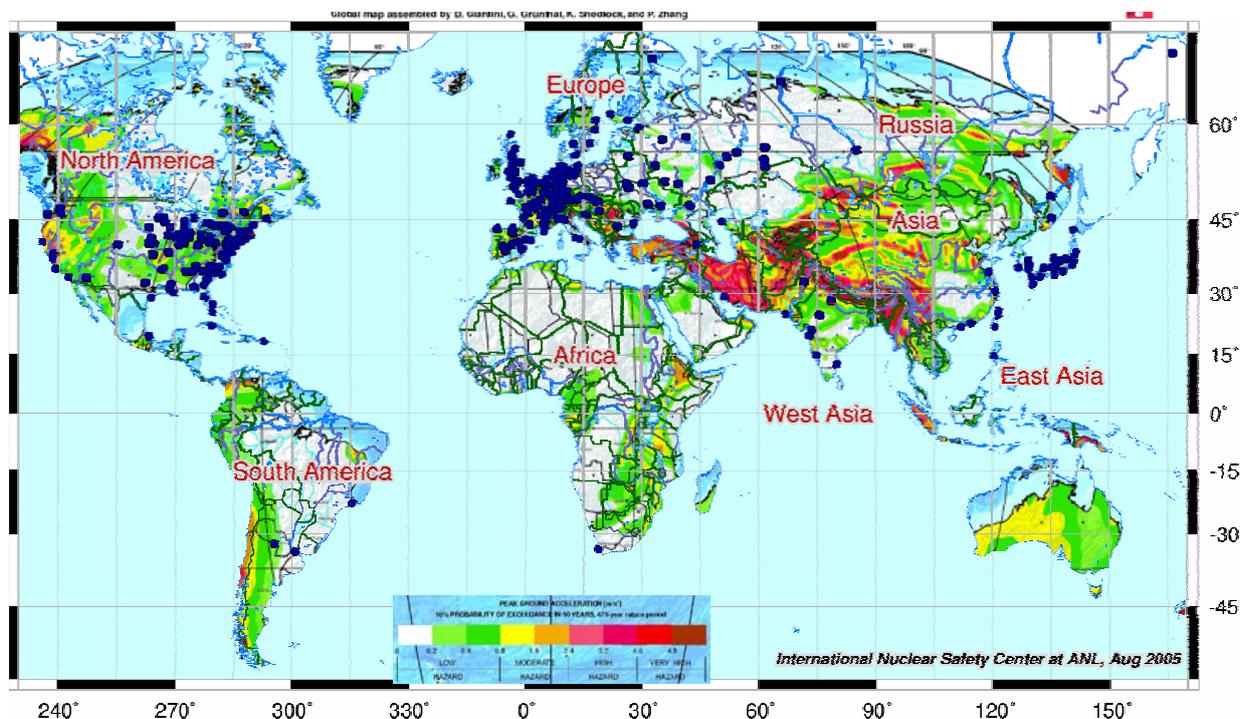


Abb. 6: Weltweite Darstellung der Kernkraftwerke und der seismischen Gefährdung [International Nuclear Safety Center, Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)]

Die Auslegungsgrundlagen von Kernkraftwerken sind unabhängig von der standortspezifischen Erdbebengefährdung. In Regionen mit sehr hoher Erdbebengefährdung ergeben sich höhere Beanspruchungen in den einzelnen Baustrukturen und hierdurch größere Querschnittsabmessungen bzw. Bewehrungsmengen. Dadurch, dass die gesamte Anlage für diese höheren Lasten ausgelegt wird, ist das Sicherheitsniveau der Anlage jedoch auf gleich hohem Stand wie bei Anlagen in Regionen ohne Erdbebengefährdung.

Viele aktuelle Kernkraftwerkstypen werden standardmäßig für hohe Erdbebenlasten ausgelegt (eine Art Konvoi-Prinzip). Der Erdbebenauslegung werden abdeckende Erdbeben-Bemessungsspektren für Regionen mit erhöhter Erdbebengefährdung zugrunde gelegt.

6. Schadensbeobachtungen und Erfahrungen mit realen Erdbeben

6.1 Historische Erdbeben

Eine große Anzahl der in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke stehen in seismisch aktiven Regionen. Trotz dieser Tatsache sind in der Vergangenheit infolge seismischer Einwirkungen keine Unfälle mit Freisetzung radioaktiver Stoffe in Kernkraftwerken aufgetreten [9].

Kernkraftwerke werden i.A. mit Beschleunigungsmessgeräten ausgestattet, die im Falle bedeutender seismischer Einwirkungen eine Reaktorschnellabschaltung (RESA) auslösen. Der Grenzwert für die RESA liegt i.d.R. unterhalb der Bemessungsgrenze für das Auslegungserdbeben.

Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt eine Auswahl bedeutsamer Erdbebenereignisse mit den am nächstgelegenen Kraftwerksstandort gemessenen Bodenbeschleunigungen sowie den betrieblichen Auswirkungen. Besonders bemerkenswert ist das Niigata Chuetsu-Okai Erdbeben, weil dies in unmittelbarer Nähe zum Kernkraftwerksstandort Kashiwazaki Kariwa auftrat und die dort gemessenen Bodenbeschleunigungen um ein Vielfaches über denen des Sicherheitserdbebens für die Anlage lagen [10].

6.2 Niigata Chuetsu-Okai Erdbeben am Kernkraftwerksstandort Kashiwazaki Kariwa

Am 16. Juli 2007 ereignete sich vor der japanischen Küste in der Präfektur Niigata ein Erdbeben mit der Momentenmagnitude 6,6, welches unter dem Namen Niigata Chuetsu-Okai (NCO) bekannt ist. Das Epizentrum dieses Erdbebens befand sich 17 km unter der Erdoberfläche und nur 16 km vom Kraftwerksstandort Kashiwazaki Kariwa entfernt, wo das japanische Energieversorgungsunternehmen Tokyo Electric Power Company (TEPCO) insgesamt sieben Siedewasserreaktoren betreibt.

Die Auslegung der Kraftwerksblöcke für seismische Einwirkungen wurde entsprechend dem „Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities“ [11] und den „Technical Guidelines for Aseismic Design of Nuclear Power Plants“ [12] vorgenommen, die auf den Empfehlungen der entsprechenden IAEA-Sicherheitsrichtlinien beruhen. Historische Erdbeben und insbesondere zwei nahegelegene aktive Verwerfungen wurden zur Bestimmung der seismischen Einwirkungen herangezogen. Demnach ergaben sich für das Sicherheitserdbeben Starrkörperbeschleunigungen von 1,67 m/s² bis 2,73 m/s² an den Fundamentsohlen der Reaktorgebäude.

Auslöser des NCO-Erdbebens waren aber nicht die beiden bewerteten Verwerfungen, sondern eine in der japanischen See gelegene Verwerfung, die bei der damaligen Auslegung als inaktiv eingestuft wurde. Die auf den Bodenplatten der Kraftwerksblöcke gemessenen Maximalbeschleunigungen lagen zwischen 3,22 m/s² und 6,80 m/s², also zwei bis dreieinhalb Mal so hoch wie die rechnerisch angesetzten Beschleunigungen. Abb. 7 zeigt das aus den gemessenen Erdbebenzeitverläufen ermittelte Beschleunigungsspektrum im Kraftwerksblock 2 im Vergleich mit dem Auslegungsspektrum.

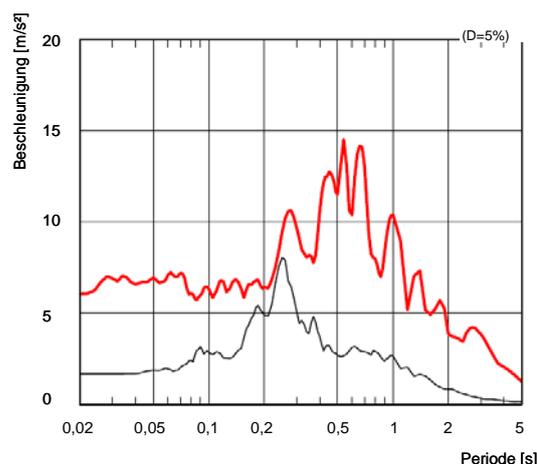


Abb. 7: Beschleunigungsspektren Kraftwerksblock 2 in Ost-West-Richtung auf Oberkante Bodenplatte [10] (dünne Linie = Auslegung; dicke Linie = gemessen)

Trotz der deutlich auslegungsüberschreitenden Erdbebenintensität wurden keine signifikanten Schäden oder Verformungen an sicherheitstechnisch relevanten Bauwerksstrukturen, Anlagensystemen

und Komponenten festgestellt. Während auf dem Kraftwerksgelände massive Bodenverformungen mit Setzungen von bis zu 1,60 m Tiefe aufgetreten sind, blieben alle aktiven, sicherheitstechnisch relevanten Komponenten funktionstüchtig und alle passiven Komponenten unbeschädigt. An Bauwerksstrukturen gemessene Rissbreiten lagen größtenteils unter 0,3 mm, Verschiebungen an Verankerungsmitteln und Halterungen wurden nicht festgestellt. Dies zeigt, dass eine sicherheitsorientierte Auslegung von Kernkraftwerken, so wie es die Sicherheitsanforderungen und -richtlinien der IAEA und die darauf basierenden nationalen Regelwerke vorsehen, offensichtlich große Konservativitäten aufweisen und somit ausreichend große Reserven auch für auslegungsüberschreitende Erdbebenereignisse bieten. Dies belegen auch dynamische Belastungsversuche der Firma NUPEC (Nuclear Power Engineering Corporation, Tokio Japan) für maschinen- und elektrotechnische Komponenten sowie für Baustrukturen von kerntechnischen Anlagen [10].

Referenzen:

- [1] DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten- Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, 2005
- [2] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, 2004
- [3] KTA 2201: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Kerntechnischer Ausschuss KTA, 1990
- [4] Kausel, E., Whitman, R.V., Morray, J.P., Elsabee, F.: The spring method for embedded foundations, Nuclear Engineering and Design 48, 1978
- [5] IAEA Requirements NS-R-1 – Safety of Nuclear Power Plants: Design; International Atomic Energy Agency, Vienna 2000
- [6] IAEA Safety Guide NS-G-3.3 – Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants; International Atomic Energy Agency, Vienna 2002
- [7] IAEA Safety Guide NS-G-1.6 – Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants; International Atomic Energy Agency, Vienna 2003
- [8] European Utility Requirements for LWR Nuclear Power (EUR), Volume 2, Revision C – Generic Nuclear Island Requirements, 2001
- [9] Hore-Lacy, Ian: Nuclear Power Plants and Earthquakes; Encyclopedia of Earth, March 5, 2009
- [10] EnBW-Arbeitsbericht: Besuch der japanischen Kernkraftwerke Kashiwazaki Kariwa und Tsuruga, 2008
- [11] NSC: Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities; Nuclear Safety Commission (NSC) of Japan, 2006
- [12] JEAG: Technical Guidelines for Aseismic Design of Nuclear Power Plants; Japan Electric Association Guideline (JEAG), 1991

Klasse	Beschreibung	Beispiele
1	<p>Anlagenteile sowie deren stützende Strukturen, die</p> <ul style="list-style-type: none"> – bei Versagen infolge eines Erdbebens direkt oder indirekt einen Unfall verursachen können – für die Abschaltung des Reaktors, für den Verbleib des Reaktors im abgeschalteten Zustand, für das Abführen der Nachzerfallswärme über einen ausreichenden Zeitraum und für diesbezüglich funktionsrelevante Überwachungs- und Steuerungsgerätschaften benötigt werden – für die Vermeidung oder Verringerung einer Freisetzung radioaktiver Stoffe erforderlich sind. 	<p>Reaktorgebäude mit Containment, Maschinenhaus (SWR),</p> <p>Strukturen und Bauwerke, die Systeme der Reaktorschnellabschaltung, Stromversorgung, Messtechnik und Überwachung einhausen oder stützen</p>
2	<p>Anlagenteile, welche die sicherheitsrelevanten Funktionen der Anlagenteile in Klasse 1 oder 3 sowie irgendwelche sicherheitsrelevanten Anlagenvorgänge</p> <ul style="list-style-type: none"> – aufgrund ihrer räumlichen Anordnung durch Versagen, Herunterfallen oder Ablösung infolge Erdbeben gefährden können – angesichts ihrer Interaktionsmöglichkeiten z.B. durch Freisetzung gefährlicher Stoffe, Feuer oder Überflutung sowie sonstiger erdbebeninduzierter Wechselwirkungen gefährden können <p>Anlagenteile, welche</p> <ul style="list-style-type: none"> – nicht zur Bauwerksklasse 1 gehören, jedoch für die Vermeidung oder Beherrschung von Unfallzuständen (ausgelöst durch Ereignisse ausgenommen Erdbeben) über einen längeren Zeitraum benötigt werden, so dass währenddessen eine begründete Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Sicherheitserdbebens besteht. – die Zugänglichkeit des Kraftwerkstandorts sicherstellen – für die Umsetzung des Notfall-Evakuierungsplans erforderlich sind 	<p>Maschinenhaus (DWR), Abluftkamin, Kühlwasser-Einlaufbauwerk, Zugangsstraßen</p>
3	<p>Anlagenteile, die</p> <ul style="list-style-type: none"> – eine radiologische Gefährdung darstellen können, jedoch nicht in Bezug auf den Reaktor 	<p>Lager für abgebrannte Brennelemente oder radioaktiven Abfall</p>
4	<p>Anlagenteile, die</p> <ul style="list-style-type: none"> – nicht der Bauwerksklasse 1, 2 oder 3 angehören 	<p>Werkstätten, Kantine, Verwaltungsgebäude</p>

Tabelle 1: Klassifizierung der Bauwerke, Anlagen und Systeme entsprechend IAEA [7]

	Ersatzkraftverfahren	Antwortspektrumverfahren	Frequenzbereichsanalyse	Nichtlineare statische Berechnung	Nichtlineare/Lineare dynamische Berechnung (Zeitverlaufsberechnung)
Einsatzbereich	regelmässige Bauwerke	alle Bauwerke	alle Bauwerke	regelmässige Bauwerke	alle Bauwerke
Erdbebenanregung	Bodenantwortspektrum	Bodenantwortspektrum	Zeitverlauf	Bodenantwortspektrum	Zeitverlauf
Modell	2D	2D oder 3D	2D oder 3D	2D	2D oder 3D
Materialmodell	linear	linear	linear	nichtlinear	nichtlinear
berücksichtigte Eigenformen	Grundform	alle	-	Grundform	-
Dämpfungsmodell	viskos	viskos	viskos und hysteretisch	viskos	viskos und hysteretisch
Berücksichtigung Torsion	Amplifikationsfaktor	linear	linear	Amplifikationsfaktor	nichtlinear
Berücksichtigung Material-nichtlinearitäten*	q-Faktor	q-Faktor	nicht möglich	nichtlineares Materialmodell	nichtlineares Materialmodell
Ergebnisse	Schnittkräfte und Verformungen	Schnittkräfte und Verformungen	Schnittkräfte und Verformungen	lokaler Duktilitätsbedarf, Schnittkräfte und Verformungen	lokaler Duktilitätsbedarf, Schnittkräfte und Verformungen
Typische Anwendung	Auslegung	Auslegung	Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren)	Überprüfung bestehender Bauwerke	Spezialbauwerke
Aufwand	niedrig	mittel	mittel	mittel	hoch

Tab. 2: Berechnungsverfahren und die zugehörigen Modelleigenschaften
 (*-Zulässigkeit orientiert sich an der Klassifizierung der Bauwerke, s. auch Tab. 1)

Jahr	Erdbeben	Magnitudo	betroffene KKW-Standorte	Entfernung Epizentrum	gemessene Standortbodenbeschleunigung / Reaktion
1988	Spitak, Armenien	6,8	Metsamor	75 km	- / Normalbetrieb
1993	Honshu, Japan	5,8	Onagawa	30 km	0,12 g / RESA
1994	Northridge, Kalifornien	6,7	San Onofre, Diablo Canyon	130 km, 240 km	0,02 g / Normalbetrieb, 0,01 g / Normalbetrieb
1995	Hyogoken-Nanbu (Kobe), Japan	6,9	Takahama, Ohi, Mihama	130 km, 180 km	- / Normalbetrieb
1999	Chi Chi, Taiwan	7,6	Chinshan, Kuosheng	175 km	0,04 g / RESA, ausgelöst durch Netzausfall
2003	Honshu, Japan	7,0	Onagawa	48 km	0,19 g / RESA
2007	Niigata Chuetsu-Oki, Japan	6,6	Kashiwazaki Kariwa	16 km	0,69 g / RESA

Tabelle 3: Erdbeben und ihre Auswirkungen auf laufende Kernkraftwerke